

ブレーキキャリパ用高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物の引張りおよび疲労特性

林 忠 夫\*・大 島 聰 範\*\*・濱 野 康 彦\*\*\*・桑 原 克 典\*\*\*\*

Tensile and Fatigue Properties of Aluminum Alloy Castings for Brake-caliper Use

Tadao HAYASHI, Toshinori OSHIMA, Yasuhiko HAMANO  
and Katsunori KUWAHARA

Abstract

The tensile and fatigue properties of high strength and toughness Al-Cu-Mg alloy castings for brake-caliper use (Nippon Light Metal Co., Ltd, NU-10) have been investigated. These properties of the NU-10 alloy were compared with that of AC4CH alloy. The tensile strength and ductility value of NU-10 alloy are superior to the value of AC4CH alloy, and are comparable with that of wrought alloys such as A6061 alloy. The tensile strength is affected by small defects in cast structure, but effect of hardness and dendrite cell size is not clear. The fatigue strength of NU-10 alloy is superior to the AC4CH alloy under high stress and low cycle condition. The crack growth rate of NU-10 alloy is approximately equivalent to that of AC4CH alloy.

Key words : Al-Cu-Mg alloy castings, tensile, fatigue, dendrite cell size, cast defects,  
brake-caliper

1. 緒 言

近年の自動車産業の大きな課題は環境に対する問題である。例えば、燃費向上、自動車の排気ガスにおける有害物質の低減等が挙げられる。これらの事への対策の一つとして、自動車の各部材の軽量化が重要である。一般に、部材の軽量化には材料の比強度（強度／比重）の向上が極めて有効であり、その点で高強度アルミニウム合金が注目されている。ただし、動的負荷の条件下で使用される部材においては、静的強度のみならず特に優れた疲労特性が要求される。本研究では、日本軽金属㈱製ブレーキキャリパ用の高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物について、主として引張り特性と硬さ、デンドライトセルサイズおよび欠陥率との関係、ならびに引張り・疲労特性を既存のア

ルミニウム合金鋳物（AC4CH合金）と比較しつつ検討を行った。

2. 供試材および試験片

使用した試料（社内規格NU-10合金）は、アルミニウム合金製ブレーキキャリパ用の実体鋳物およびJIS4号舟形試験片である。図1にそのブレーキキャリパの実体写真を示す。NU-10合金鋳物はJISAC1B合金（Al-Cu-Mg系）を改良した日本軽金属㈱の開発合金で、強度、靱性および耐熱性に優れた性質を有する鋳物である。表1にAC1B合金と比較材であるAC4CH合金のおもな化学成分を示す<sup>1)</sup>。JIS4号舟形試験片と図2に示す形状および寸法の試験片を、実体とJIS4号の引張り試験後のつかみ部から採取し、旋盤等で機械加工により製作した。(a)引張り、(b)回転曲げ疲労、(c)回転曲げ疲労き裂進展、(d)疲労き裂進展(CT)の各試験片である。なお、(c)の試験片にはき裂の測定を行うため、平行部中央に切欠きとしてドリルでφ0.3×0.5mmの小穴を

\* 技 官 (技術専門職員)機械実習工場  
\*\* 名誉教授 苫小牧高専  
\*\*\* 日本軽金属㈱苫小牧製造所  
\*\*\*\* 技 官 機械工学科

あけた<sup>2)</sup>。図3に実体からの回転曲げ試験片の採取位置の例を示す。硬さ試験，デンドライトセルサイズおよび欠陥率の測定には引張り，疲労試験片のつかみ部からφ12×18mmの円柱状の試験片を採取した。

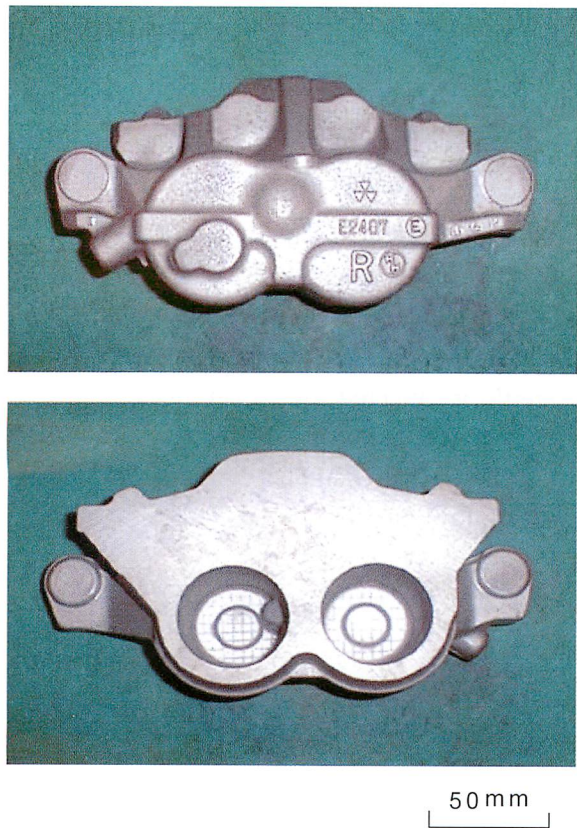


図1 ブレーキキャリパの実体

表1 AC1BおよびAC4CH合金の化学成分 (wt%)

| 合金    | Cu          | Si          | Mg            | Zn         | Fe         | Mn         | Al |
|-------|-------------|-------------|---------------|------------|------------|------------|----|
| AC1B  | 4.2<br>～5.0 | 0.20<br>以下  | 0.15<br>～0.35 | 0.10<br>以下 | 0.35<br>以下 | 0.10<br>以下 | 残部 |
| AC4CH | 0.20<br>以下  | 6.5<br>～7.5 | 0.25<br>～0.45 | 0.10<br>以下 | 0.20<br>以下 | 0.10<br>以下 | 残部 |

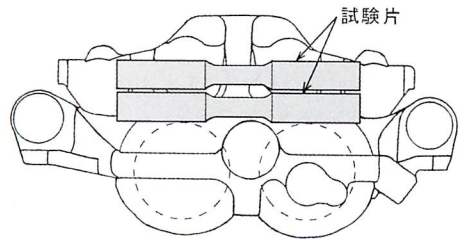


図3 採取位置の例 (回転曲げ試験片)

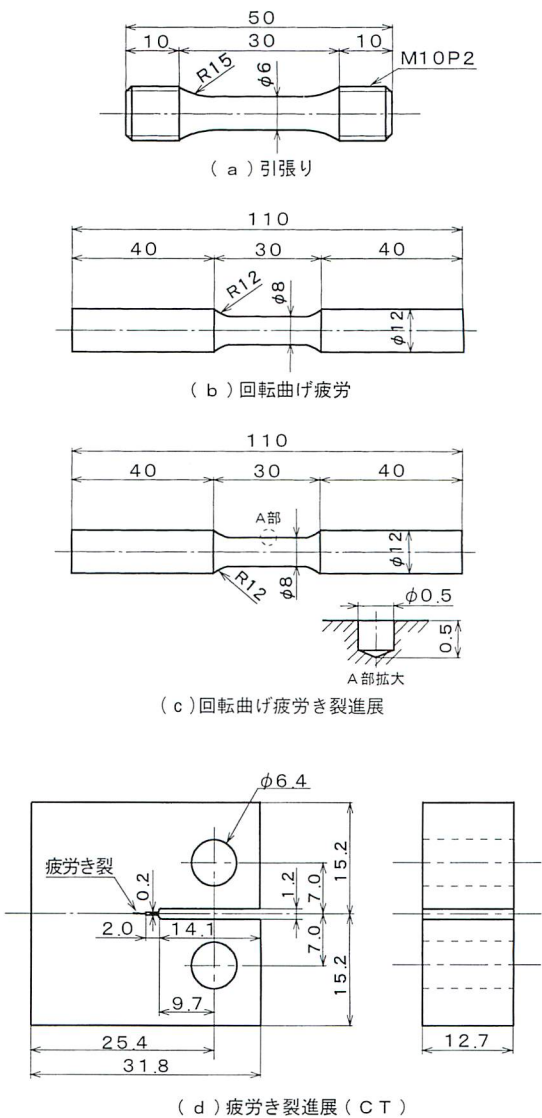


図2 試験片の形状および寸法

3. 実験方法

引張り試験はコンピュータ計測制御式精密万能試験機を使用し引張り速度 $3.3\times10^{-5}$ m/sで行った。なお、0.2%耐力は試験片の平行部に貼付した歪みゲージ，または伸び計 (SG50-50) で検出した。硬さ試験はビッカース硬さ試験機で行った。高サイクル疲労および疲労き裂進展試験は小野式回転曲げ疲労試験機 (98 N・m，回転数1440，2850rpm) で行った。き裂の測定にはレプリカ法を用いて，アセチルセルロースフィルムに転写したき裂長さを金属顕微鏡で測定した。デンドライトセルサイズの測定は試料を10%カセイソーダにて腐食し組織を現出させて，金属顕微鏡で写真撮影して交差法 (交差数  $n=6$ ) を用いて行った<sup>3)</sup>。

欠陥率は写真中の80×250mmに占める欠陥の割合を測定して求めた。C T試験片による疲労き裂進展試験およびき裂進展過程の観察には、電気油圧サーボ式疲労試験機を使用し応力比R = 0.1、繰返し速度20 Hzの片振り引張り荷重条件下で試験して、き裂長さを50倍の読取り顕微鏡で測定した。また、応力拡大係数幅ΔKの算出には次式を用いた<sup>4)</sup>。

$$\Delta K = \frac{\Delta P (2 + a)}{B \cdot W^{1/2} (1 - a)^{3/2}} (0.886 + 4.64 a - 13.32 a^2 + 14.72 a^3 - 5.6 a^4)$$

ここで、ΔP：荷重範囲、 $a = a / W$ 、a：き裂長さ、B：試験片板厚、W：試験片幅である。

4. 実験結果および考察

4.1 引張り特性

表2にNU-10合金（舟型・実体）および比較材としての鋳造用合金（AC4CH）と展伸用合金（A6061）の引張り特性値を示す。NU-10合金の舟型と実体材の特性値はほぼ同じである。NU-10合金はAC4CH合金よりも引張り強さσ<sub>B</sub>で約110MPa、伸びδで約5%高い。A6061合金と比較しても、伸びは若干低くなるが引張り強さは約70MPa高く、鋳造用合金としては高い引張り強さと伸びを示し展伸材に匹敵する機械的性質を有している。また、球状黒鉛鋳鉄（FCD）と比較してもアルミニウムの比重（鋼の約1/3）を考えると、アルミ鋳物化による軽量化が可能になりその利用価値は高いといえる。

図4にNU-10合金の舟型と実体材における、ビッカース硬さHvと引張り強さσ<sub>B</sub>および伸びδとの関係を示す。両材ともビッカース硬さが約

HV123から145の範囲では、引張り強さは約380MPa、伸びは約15%とほぼ一定の値を示す。一般に、金属材料においては硬さと引張り強さは比例することが多いが、これらの試験片ではそのような関係は成立していない。従って、硬さの増加に伴う引張り強さの増加を阻害する何らかの要因、例えば鋳造欠陥などが影響を及ぼしていると考えられる。

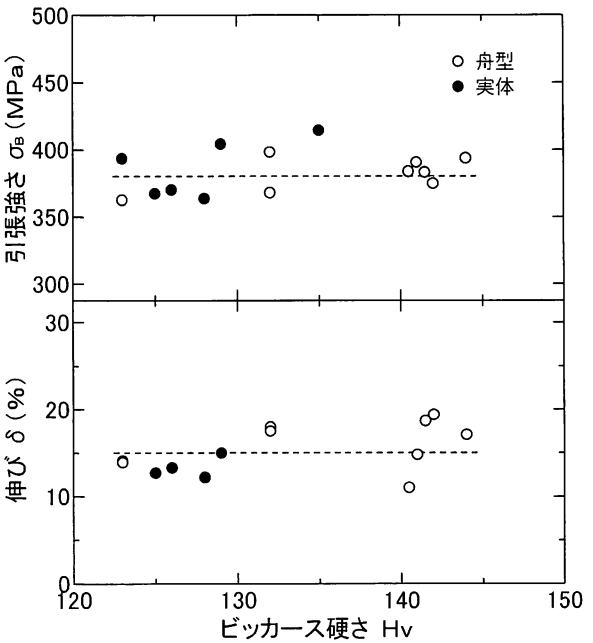


図4 ビッカース硬さと引張さおよび伸びとの関係

図5にデンドライトセルサイズ（以下、DCS）と引張り強さσ<sub>B</sub>および伸びδとの関係を示す。DCSは鋳物の凝固時の冷却速度に支配され、DCSが大きくなるにしたがい引張り強さ、硬さは減少する傾向を示すとされている。DCSが約50μmから120μmの範囲では、硬さの場合と同様に引張り強さは約380MPa、伸びは約15%でほぼ一定である。硬さの結果とあわせて考えると、引張り特性に影響を及ぼす要因としては、硬さやDCSよりも微小鋳造欠陥によるものと考えられる。

ここで、微小鋳造欠陥の割合である欠陥率Rsと引張り強さσ<sub>B</sub>および伸びδとの関係を図6に示す。データの数やや少ないが欠陥率が約0.2%で引張り強さは約410MPa、約0.8%に増加すると約370へと40MPa減少している。これは引張り強さが組織中に介在する微小鋳造欠陥の影響を受けていることを示している。しかし、伸びについては欠陥率が変化してもほぼ一定の値を示しているが、この理由については明らかでない。

表2 NU-10合金および比較材の引張り特性

| 材料           |    | 引張強さ<br>(MPa) | 0.2%耐力<br>(MPa) | 伸び<br>(%) |
|--------------|----|---------------|-----------------|-----------|
| NU-10合金      | 舟型 | 382           | 290             | 15.9      |
|              | 実体 | 386           | 301             | 14.2      |
| AC4CH合金      |    | 268           | 163             | 10.4      |
| 展伸用合金(A6061) |    | 309           | 274             | 17.0      |

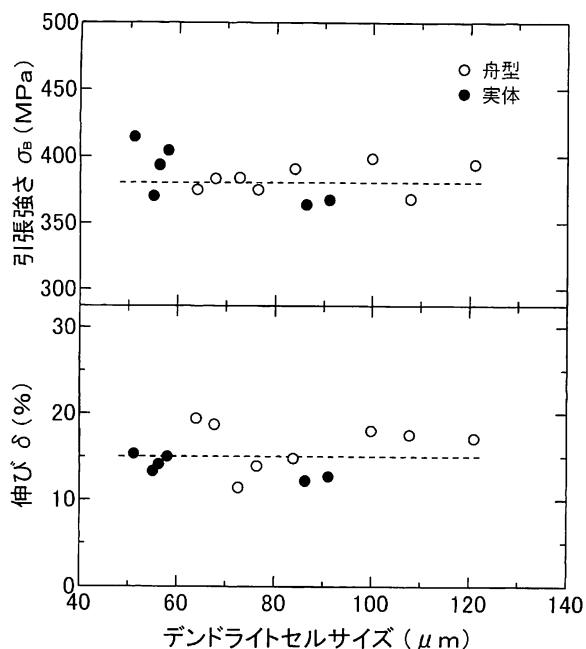


図5 デンドライトセルサイズと引張強さおよび伸びとの関係

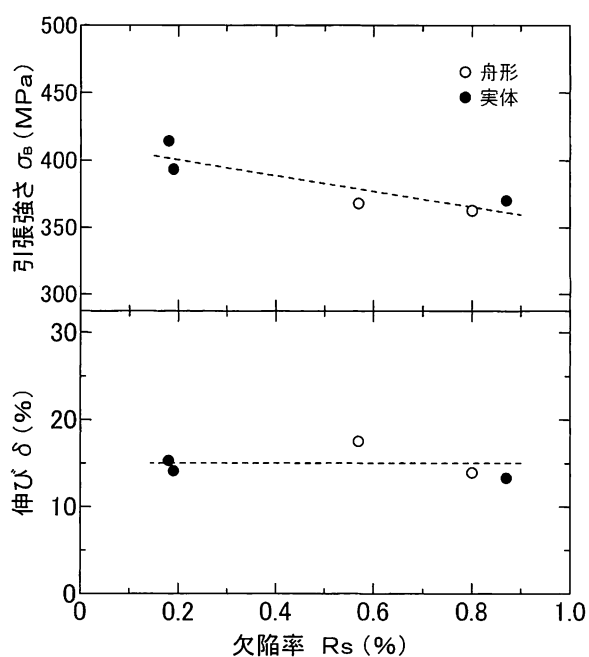


図6 欠陥率と引張強さおよび伸びとの関係

## 4.2 疲労特性

図7にNU-10合金および鋳造用合金AC4CH合金の回転曲げ高サイクル疲労試験におけるS-N曲線を示す。AC4CH合金に比べてNU-10合金のS-N曲線の傾きは大きく、疲労限度 $\sigma_w$ は約110MPaでほぼ同じである。しかし、応力振幅 $\sigma_a$ が150MPa以上ではNU-10合金の方が破断繰返し数で優れており、高応力で比較的繰返し数の少ない使用条件においてはNU-10合金が適

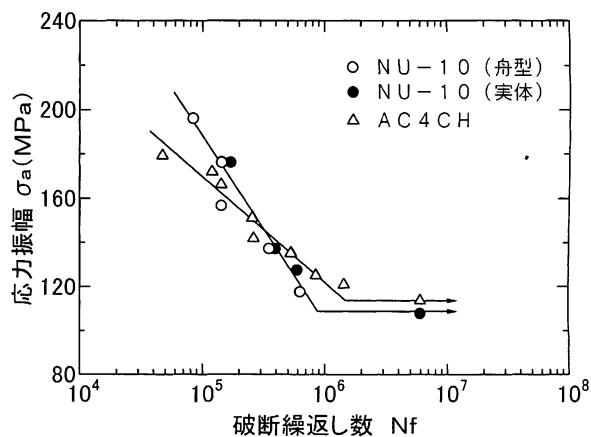


図7 NU-10およびAC4CH合金のS-N曲線

しているといえる。この場合の高応力域におけるS-N曲線の差異の原因は、両者の引張り特性の差による影響であると考えられる。

図8に応力振幅 $\sigma_a = 118\text{MPa}$ で試験を行ったときのNU-10合金およびAC4CH合金における、応力繰返し数 $N$ と疲労き裂長さ $a$ との関係を示す。NU-10、AC4CHの両合金の傾向はほぼ同じである。ここで図8の疲労き進展曲線から、NU-10合金およびAC4CH合金の疲労き進展速度 $da/dN$ を求め、応力拡大係数幅 $\Delta K$ との関係を図9に示す。この $da/dN - \Delta K$ の関係は一般にParisの式 $da/dN = C(\Delta K)^m$ で直線近似でき、き裂進展特性が評価される<sup>5)</sup>。Cおよびmは定数である。これを求めると次式が得られる。

$$\text{NU-10合金: } da/dN = 2.0 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.4} \quad (1)$$

$$\text{AC4CH合金: } da/dN = 1.4 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.4} \quad (2)$$

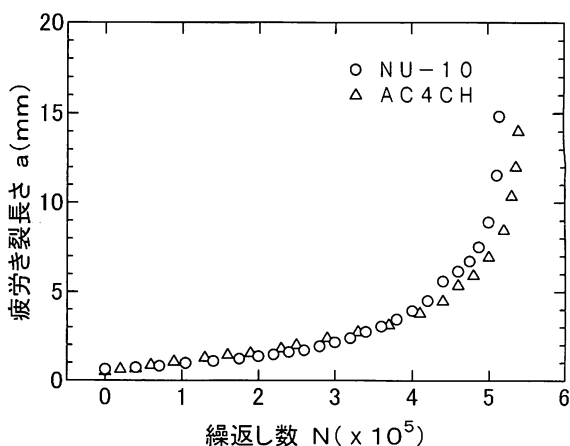


図8 繰返し数と疲労き裂長さとの関係

(1), (2)式より両合金の回転曲げ疲労き裂進展速度はほぼ同じである。AC4CH合金は表2に示すように、NU-10合金よりも機械的性質が劣る材料であるが、これは試験を行った応力レベルでは、図7におけるNU-10とAC4CH合金のS-N曲線が交差し、時間強度が等しくなっていることに対応するものと考えられる。また、疲労き裂の進展に対する下限界応力拡大係数幅 $\Delta K_{th}$ はともに約 $5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ でありほぼ同じである。

つぎに、疲労き裂進展速度試験として一般的に行われているCT試験による比較を行った。図10にNU-10合金における回転曲げおよびCT試験による、疲労き裂進展速度 $da/dN$ と応力拡大係数幅 $\Delta K$ との関係を示す。図より(3), (4)式が得られCT試験の方がCの値が大きく、き裂進展速度が速くなる。勾配 $m$ はほぼ同じである。また、下限界応力拡大係数幅 $\Delta K_{th}$ は小さくなる。

回転曲げ試験： $da/dN = 2.0 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.4}$  (3)

CT試験： $da/dN = 7.0 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.4}$  (4)

図11にNU-10合金の疲労き裂進展過程を示す。(a)は疲労き裂の進展経路であり、(b)はそのき裂の先端である。一般にアルミニウム合金鋳物の疲労き裂は、粒界に沿って進展すると言われているが、NU-10合金の疲労き裂は組織中の粒界にあまりとらわれずに、結晶内を突き抜けている。また、き裂は途中枝分かれして様々な方向に進展している。

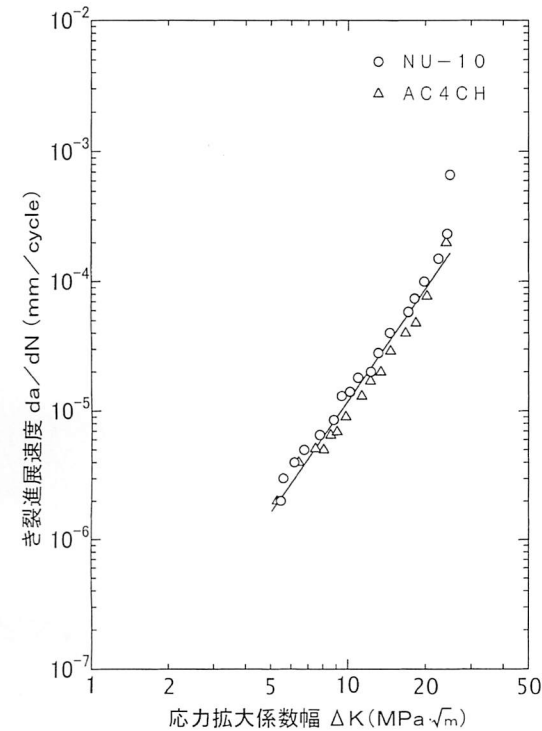


図9 疲労き裂進展特性

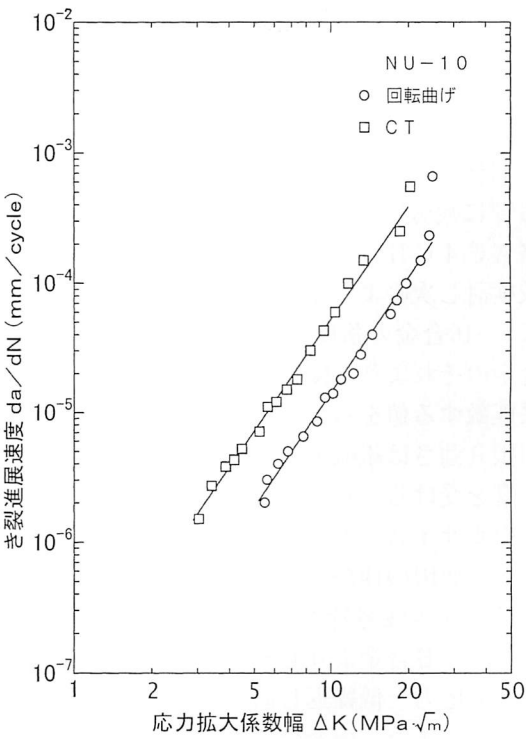
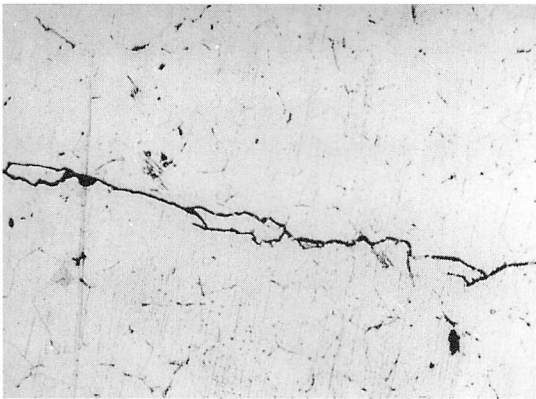
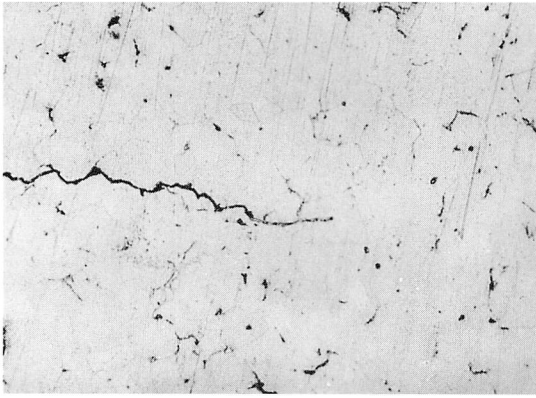


図10 回転曲げおよびCT試験による疲労き裂進展特性



(a) 進展経路



(b) き裂先端

図11 疲労き裂進展過程

## 5. 結 言

ブレーキキャリア用アルミニウム合金鋳物（社内規格NU-10合金）について、引張り特性と硬さ、デンドライトセルサイズおよび欠陥率との関係、ならびに疲労特性を調べた。また、既存のJIS規格AC4CH合金についても同様の実験を行い、比較検討し次のような知見を得た。

- (1) NU-10合金の強度および延性は、AC4CH合金のそれよりも優れており、展伸材（A6061）に匹敵する値を示した。
- (2) 引張り強さは組織中に介在する微小鋳造欠陥の影響を受ける。しかし、硬さおよびデンドライトセルサイズの影響は不明確である。また、これらの要因の伸びへの影響は認められない。
- (3) 高サイクル疲労特性におけるNU-10合金は、AC4CH合金よりもS-N曲線の傾きが大きく、高応力・低繰返し領域において優れた特性を示す。また、両合金の疲労き裂進展特性はほぼ同じである。

## 謝 辞

本実験に使用した材料は、日本軽金属㈱苫小牧製造所より提供されたものであり、そのご厚意に深く感謝します。また、本報をまとめるにあたり機械工学科高澤幸治助手にご指導、ご助言いただいたことを記し感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本規格協会：JISハンドブック，非鉄，H5202（2001）
- 2) 皮籠石，西谷，都野：Al合金鋳物のき裂伝播特性に及ぼす熱処理の影響，機論 55-516，A（1989）p.1733
- 3) 軽金属学会 鋳造・凝固部会：デンドライトアームスペーシング測定手順，軽金属，vol.38（1988）p.54
- 4) Annual Book of ASTM Standards：vol.03.01，E647-91（1991）654
- 5) P.C.Paris and F.Erdogan：Trans.ASME，Ser.D，85（1963）528

（平成13年11月28日受理）